DOI: 10.22067/geography.v17i2.62375
مقالهٔ پژوهشی

# تحلیل زمانی غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون (PM2.5) شهر مشهد

**رضا اسماعیلی (دکتری تخصصی آب‌وهواشناسی، مسئول مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشهد، معاونت خدمات شهری، شهرداری مشهد، مشهد، ایران)**
**esmaili-r@mashhad.ir**

صص ۱۹۰ ـ ۱۷۱

## چکیده

**اهداف:** در این تحقیق توزیع فضایی غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون به‌عنوان آلایندهٔ اصلی هوای شهر مشهد، با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای پهنه‌بندی شده است.

**روش:** آمار غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون شهر مشهد به‌عنوان آلایندهٔ اصلی برای دورهٔ آماری ۱۳۹۰ تا ۱۳۹٤ در مقیاس زمانی ساعتی برای ۱۰ ایستگاه سطح شهر جمع‌آوری شد و با توجه به هدف و مقیاس مدنظر، ماتریس داده‌ها به شکل S آرایش داده شد. ماتریس‌های تنظیم‌شده در محیط XLSTAT با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی به روش ادغام وارد (Ward) تحلیل شدند.

**یافته‌ها/نتایج:** نتایج نشان داد که ۳٦٥ روز سال را می‌توان به سه خوشهٔ مجزا تفکیک کرد. نتایج تحلیل ماهانه نشان داد که ماه‌های شهریور، آبان و آذر در یک خوشه و دارای بیشترین غلظت ذرات معلق قرار می‌گیرند و ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد و مهر در خوشهٔ دوم با کمترین بار آلودگی هوا قرار می‌گیرند. نتایج تحلیل روزهای هفته نشان داد که هفت روز هفته در چهار گروه همگن تفکیک‌شدنی است. از لحاظ غلظت، ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون ساعات شبانه‌روز در چهار خوشهٔ مجزا جای می‌گیرند.

**نتیجه‌گیری:** استفاده از تحلیل خوشه‌ای و بررسی تغییرات زمانی ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون به‌عنوان آلایندهٔ اصلی مشهد در مقیاس ماهانه، سالانه،

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۰٤/۰۱

روزهای هفته و ساعتی می‌تواند در برنامه‌ریزی مدیریت و کاهش آلودگی هوا مفید واقع شود.

**کلیدواژه‌ها:** آلودگی هوای مشهد، ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون، خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، آلایندهٔ اصلی.

**مقدمه**

براساس گزارش سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۱۲، حدود هفت میلیون نفر در سراسر جهان در اثر آلودگی هوا جان خود را از دست داده‌اند که از این تعداد ۳/۷ میلیون نفر در اثر مواجهه با آلودگی هوا در محیط باز فوت کرده‌اند و ۸۸ در صد از این مرگ‌ومیرها در کشورهای با درآمد متوسط و کم اتفاق افتاده است (سازمان بهداشت جهانی[1]، ۲۰۱٤). به‌طورکلی، یک‌هشتم از مرگ‌ومیر جهانی، ناشی از قرارگرفتن در معرض آلودگی هواست. این یافته‌ها بیش از دو برابر تخمین‌های قبلی است و تأیید می‌کند که درحال‌حاضر آلودگی هوا بزرگ‌ترین خطر برای سلامت محیط‌زیست شهری در جهان است.

براساس این گزارش، بیشترین تلفات مرگ‌ومیر از آلودگی هوا در کشور چین ناشی می‌شود که هرساله حدود ٦٥٦ هزار چینی جان خود را از دست می‌دهند. در هند نیز سالانه حدود ۵۲۷ هزار و ۷۰۰ نفر در اثر آلودگی هوا می‌میرند. در ایالات متحده استنشاق آلاینده‌های هوا ۷۰ هزار نفر شهروند آمریکایی را به کام مرگ می‌برد. همچنین، آلودگی هوا در انگلیس و فرانسه به‌ترتیب ۲۰ هزار و ٤۰ هزار نفر را دچار مرگ زودرس می‌کند (سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۱٤). طبق برنامهٔ محیط‌زیست ملل متحد، رتبهٔ ایران از لحاظ آلودگی هوا در بین ۱۳۳ کشور جهان ۱۱۷ است. براساس گزارش بانک جهانی، خسارات سالیانهٔ آلودگی هوا در ایران معادل ۷٦ درصد تولید ناخالص داخلی بوده است و در اجرای برنامه‌های کاهش آلودگی هوا حدود سی سال از کشورهای پیشرفتهٔ جهان عقب‌تر هستیم (ادب، ۱۳۹٤).

در میان آلاینده‌های اصلی هوا ذرات معلق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. این ذرات دارای اندازه‌هایی متفاوت بین ۰/۰۰۰۰۰۲ تا ۵۰۰ میکرون هستند (بوبل، والرو، فاکس، تورنر و

1. World Health Organization

استرن[1]، ۲۰۱۳) که دراین‌میان ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون دارای اثرهای بهداشتی و سلامتی چشمگیری هستند؛ زیرا، این ذرات قابلیت راه‌یابی به سیستم تنفسی بدن انسان را دارند (میری و همکاران، ۱۳۹٤). در همین ارتباط، کولیمیجر، هومان و ماتیجسن[2] در سال ۲۰۰٦ به بررسی فضایی و زمانی تغییرات ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون (PM)[3] و قطر نوری ذرات (AOT)[4] در سطح اروپا پرداختند. نتایج نشان داد که تغییرات AOT و PM در فصول متفاوت به‌طور مشخصی متفاوت است. در بیشتر مناطق اروپا، میزان AOT اندازه‌گیری‌شده در فصل زمستان کمترین میزان خود را دارد؛ درحالی‌که تغییرات فصلی PM در سراسر اروپا و همچنین در مناطق دارای تغییرات فصلی آشکار، بسیار کمتر از AOT بود. کئورول[5] و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی تغییرات فضایی و زمانی ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ و ۱۰ میکرون ($PM_{10}$ و $PM_{2.5}$) موجود در هوا در کشور اسپانیا پرداختند. میانگین غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون و ترکیبات شیمیایی در اسپانیا تغییرات درخور توجهی را در سراسر کشور نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که سطح ذرات با قطر ۱۰ میکرومتر در نواحی مهم ترافیکی و صنعتی، بیشتر از محدودهٔ آلودگی گزارش شده است.

در زمینهٔ استفاده از روش‌های آماری در بحث آلودگی هوا، ساکسنا، جوشی و پاتیل[6] در سال ۲۰۰۲ به بررسی الگوهای مکانی تغییر آلودگی هوا در دهلی نو با روش تحلیل خوشه‌بندی پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که رابطهٔ آماری معناداری بین غلظت آلاینده‌ها و نوع ایستگاه وجود ندارد و به‌همین‌دلیل توصیه کردند در دهلی از استانداردی یکنواخت در تمامی نقاط استفاده شود. اوجدا–ماگانا[7] و همکاران (۲۰۱۰) با الگوی PFCM الگوریتم خوشه‌بندی کاربردی به بررسی آلودگی هوا در شهر سالامانکای مکزیک پرداختند. در تحقیق دیگری، اوجدا–ماگانا و همکاران (۲۰۱۱) با به‌کارگیری الگوریتم خوشه‌بندی فازی و احتمالاتی به بررسی آلودگی هوای مکزیک پرداختند. در پژوهشی دیگر، با استفاده از تحلیل خوشه‌ای به

1. Boubel, Vallero, Fox, Turner, & Stern
2. Koelemeijer, Homan, & Matthijsen
3. Particulate Mater
4. Aerosol Optical Thickness
5. Querol
6. Saksena, Joshi, & Patil
7. Ojeda-Magana

بررسی آلودگی هوا در شهر بانگوک تایلند پرداخته شد. سپس، با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی[1] آلودگی هوا در این منطقه پهنه‌بندی شد (پراپاسورنپیتایا، جینسارت و سانگوانسینتوکول[2]، ۲۰۱۱). سایتان و مکپاریوپ[3] در سال ۲۰۱۲ با استفاده از تکنیک خوشه‌بندی آلودگی هوا و متغیرهای هواشناسی، آلودگی هوا را در منطقه‌ای صنعتی در شرق تایلند بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که متغیرهای هواشناسی به چهار گروه مجزا تفکیک‌شدنی هستند: خوشۀ اول، متغیرهای کیفی هوا، خوشۀ دوم، فشار هوا، خوشۀ سوم، درجۀ حرارت تابش آفتاب و سرعت باد و خوشۀ چهارم، باران، رطوبت نسبی، جهت باد و روزهایی با غلظت زیاد ازن. همچنین، سطح زمین می‌تواند از لحاظ بازۀ زمانی در سه گروه مجزا قرار گیرد: خوشۀ اول، ظهر و بعدازظهر، خوشۀ دوم، بازۀ زمانی غروب خورشید و خوشه‌بندی سوم، بازۀ زمانی شب.

برای کاهش هزینه‌ها و مدیریت بهتر ایستگاهای سنجش کیفیت هوا در منطقۀ کانتوی ژاپن، لیزوکا[4] و همکاران در سال ۲۰۱٤ تحلیل خوشه‌ای را روی داده‌های آلودگی هوا انجام دادند. آن‌ها دریافتند که آلاینده‌های NOX وO3 را می‌توان در هشت خوشه قرار داد که هریک از خوشه‌ها از لحاظ ویژگی‌های مکانی و رفتار زمانی دارای همگنی درون‌گروهی هستند. در همین ارتباط، توزیع فضایی و محلی داده‌های شاخص کیفیت هوا[5] ثبت‌شده در ۱٦۱ شهر مهم چین با استفاده از شاخص موران بررسی و ارزیابی شد و تأثیرگذارترین پارامترهای شهری مؤثر در این شاخص تعیین شدند (پو، لو، وانگ، وانگ و کانگ[6]، ۲۰۱۷).

در شهر مادرید اسپانیا از ابزارهای آماری تجزیه‌وتحلیل همبستگی، تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌های اصلی[7] و تجزیه‌وتحلیل خوشه‌ای[8] برای ارزیابی آلودگی هوا در این شهر استفاده شد. نتایج در زمینۀ آلاینده‌های موردبررسی شامل NO، NO2، PM10 و O3 در ۲۲ ایستگاه

1. Geography Information System (GIS)
2. Prapassornpitaya, Jinsart, & Sanguansintukul
3. Saithan & Mekparyup
4. Iizuka, Shintaro, Mizukoshi, Noguchi, Yamasaki , &Yanagisawa
5. Air Quality Index (AQI)
6. Pu, Luo, Wang, Wang, & Kang
7. Principal Component Analysis (PCA)
8. Cluster Analysis (CA)

در شبکهٔ مطالعه‌شده طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷، به وجود همبستگی میان این آلاینده‌ها با ساختارهای فضایی تأکید کردند. اقدامات پیشنهادی و برنامه‌های تدوین‌شده به‌خصوص در حوزهٔ ترافیک، با هدف بهبود کیفیت هوا از طریق تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌ای صورت گرفت (نونز-آلونسو، ویسنت پرز-آریباس، منظور و کاسرز[1] (۲۰۱۹).

در همین ارتباط، حسین‌زاده، دوستان، حقیقت ضیا بری و حقیقت ضیا بری(۱۳۹۲) با هدف شناسایی الگوهای جوی مؤثر در آلودگی هوای شهر مشهد دورهٔ آماری ۱۳۸۶-۱۳۸۹ را بررسی کردند. آن‌ها دو آلایندهٔ مونو اکسید کربن (CO) و مواد معلق ($PM_{10}$) در نیمهٔ سرد سال، داده‌های روزانهٔ فشار سطح دریا[2] (SLP) و ۵۰۰ هکتوپاسکال را ارزیابی کردند و درنهایت، با روش‌های چندمتغیره، تحلیل مؤلفهٔ اصلی و خوشه‌بندی روزهای شناسایی‌شده را در پنج گروه جای دادند و برای هر گروه، نقشه‌های مرکب از داده‌های سطح متوسط دریا (SLP) و ۵۰۰ هکتوپاسکال تهیه و تفسیر همدید شد.

در تحقیقی دیگر، حجازی، مباشری و احمدیان مرج (۱۳۹۱) با استفاده از داده‌های سنجندهٔ مودیس به اندازه‌گیری ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون در هوای شهر تهران پرداختند تا نقشهٔ توزیع مکانی ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون را در شهر تهران برآورد کنند. در این تحقیق، با استفاده از رگرسیون خطی، بین سهم بازتابندگی ناشی از پراکنش توسط هواویزها، مستخرج از داده‌های سنجندهٔ مودیس و غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از دو و نیم میکرومتر اندازه‌گیری‌شده توسط دوازده ایستگاه آلودگی‌سنج شهر تهران، ارتباط برقرار شد. نتایج نشان داد که آلودگی مناطق مرکزی بیش از سایر قسمت‌های شهر است.

اسماعیلی (۱۳۹۲) در تحقیقی با استفاده از روش خوشه‌بندی، ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای مشهد را از لحاظ دو آلایندهٔ PM2.5 و CO بررسی کرد. محوی و همکاران (۱۳۹۳) تغییرات ذرات معلق در هوای شهر تبریز و ارزیابی اثرهای بهداشتی منتسب به این آلاینده را بررسی کردند. یونسیان و همکاران (۱۳۹۳) تغییرات غلظت ذرات معلق ۱۰، ۲/۵ و یک میکرون را در هوای شهر تهران در زمان وقوع پدیدهٔ ریزگردها بررسی کردند. حاتمی، بیگلو،

1. Nunez-Alonso, Vicente Perez-Arribas, Manzoor, & Caceres
2. Sea Level Pressure (SLP)

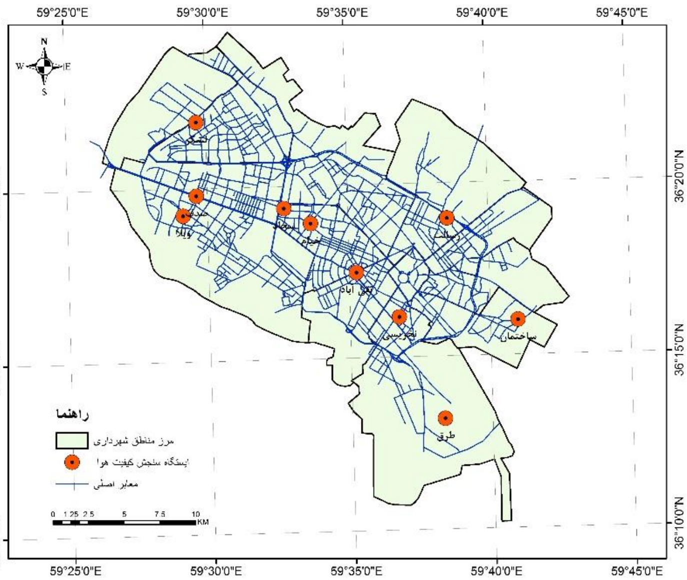
نارنگی فرد و امیدوار (۱۳۹۳) با استفاده از روش خوشه‌بندی الگوهای همدید، روزهای آلوده به ذرات معلق شهر شیراز را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که یک سامانهٔ پرفشار در تراز دریـا با ریزش هوای سرد به‌همراه یک سامانهٔ واچرخندی (پرارتفاع) در تراز ۸۵۰ با حاکمیـت جـو فشارورد[1] در تراز پانصد در دورهٔ سرد، عوامل اصلی الگوهای همدید روزهای آلوده به ذرات معلق هستند. به‌تازگی، نواحی همگن آلودگی هوای مشهد از لحاظ بار ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون در دوره‌ای دوساله با استفاده از GIS و روش تحلیل خوشـه‌ای بررسـی شـدند. براساس نتایج این تحقیق، سه منطقهٔ همگن و مجزا برای مشهد مشخص شد: منطقهٔ کم‌غلظت در شمال غرب، منطقهٔ آلوده با غلظت زیاد ذرات معلق در شرق و جنوب شرق و منطقهٔ حائل که بار آلودگی متوسط دارد (اسماعیلی، ۱۳۹۷). بررسی منابع موجـود نشـان مـی‌دهـد کـه در غالب مطالعات انجام‌شده یا توزیع مکانی آلاینده‌های هوا در نظر گرفته شده است یا به بررسی علل هواشناسی به‌خصوص الگوهای سینوپتیکی در بروز آلودگی هوا پرداختـه شـده اسـت و کمتر تحلیل زمانی مدنظر قرار گرفته است؛ بنابراین، هدف از انجام ایـن پـژوهش اسـتفاده از روش‌های آماری ازجمله تحلیل خوشه‌بندی در تعیـین بازه‌هـای همگـن زمـانی ذرات معلـق به‌عنوان آلایندهٔ اصلی هوای شهر مشهد است. برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران شهری می‌تواننـد از نتایج این پژوهش در بحث مدیریت آلودگی هوا، به‌خصوص برنامه‌ریزی برای مدیریت کنترل و کاهش آلودگی هوا استفاده کنند.

**۲. روش‌شناسی تحقیق**

شهر مشهد با جمعیتی بالغ بر سه میلیون نفر و مساحت ۳۲۸ کیلومتر مربع دومین کلان‌شهر ایران است که وجود بارگاه ثامن‌الحجج (ع) و آثار تاریخی و فرهنگی فـراوان هرسـاله باعـث می‌شود که ۲۰ تا ۳۰ میلیون نفر زائر و گردشگر این شهر را برای سفر برگزینند. به‌دلیل تراکم زیـاد جمعیتـی و توسـعهٔ فیزیکـی سـریع شـهر، آلـودگی هـوا بـه یکـی از معضـلات اصـلی زیست‌محیطی این شهر تبـدیل شـده اسـت. براسـاس گزارش‌هـای مرکـز پـایش آلاینـده‌های زیست‌محیطی مشهد در سال ۱۳۹٤، تنها ٤۲ روز هوای شهر مشهد در وضعیت پاک و مطلوب

1. barotropic

بوده است. در تحقیق حاضر برای تحلیل زمانی هوای شـهر مشـهد هـوا از آمـار ۱۰ ایسـتگاه سنجش کیفیت هوا استفاده شده است که در سطح شهر مستقرند. بدین‌منظور، داده‌های ساعتی ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون که آلایندهٔ اصـلی شـهر مشـهد اسـت، در ایسـتگاه‌های موردمطالعه که در شکل (۱) موقعیت و توزیع آن‌ها در سطح شهر نشـان داده شـده اسـت، از تاریخ ۱۳۹۰/۱/۱ تا ۱۳۹٤/۱۲/۲۹ از مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشـهد جمـع‌آوری شدند.




**شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا در سطح شهر مشهد**

مأخذ: سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری مشهد، ۱۳۹۵

داده‌های جمع‌آوری‌شده در ماتریس‌هایی با مقیاس‌های زمانی و مکانی تنظیم و آرایش‌داده شدند. چگونگی آرایش داده‌ها در به‌دست‌آمدن ترکیب زمانی یا مکانی داده‌هـا بسـیار اهمیـت دارد؛ به‌طوری‌که در اعمال تحلیل خوشه‌ای، ماتریس داده ها با آرایش T (مکان روی سـطرها و زمان روی ستون‌ها) منجر به تفکیک مکانی می‌شـوند، امـا در آرایـش S کـه زمان‌هـا روی سطرها و مکان‌ها روی ستون‌هاست، تفکیک زمانی حاصل می‌شود (منتظری، ۱۳۹۰).

اعمال تحلیل خوشه‌ای در دو مرحلهٔ اساسی صورت می‌گیرد: مرحلهٔ اول، محاسبهٔ درجهٔ همانندی عضوها با یکدیگر است و مرحلهٔ دوم، چگونگی ادغام عضوها بر حسب درجهٔ همانندی آن‌ها با یکدیگر است. بسته به روشی که برای محاسبهٔ درجهٔ همانندی و چگونگی ادغام انتخاب می‌کنیم، یک تحلیل خوشه‌ای را می‌توان به شیوه‌های گوناگونی اجرا کرد. برای محاسبهٔ درجهٔ همانندی روش‌های متفاوتی پیشنهاد شده است که یکی از آن‌ها فاصلهٔ اقلیدسی است. اگر xr بردار مشاهدات روی xs و r بردار مشاهدات روی s باشد، در این صورت فواصل یادشده در بالا به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند (مؤمنی، ۱۳۹۰):

$$d_{rs}^2 = (X_r - X_s)(X_r - X_s)'$$

در مطالعات محیطی غالباً برای محاسبهٔ درجهٔ همانندی از فاصلهٔ اقلیدسی استفاده می‌شود. پس از اندازه‌گیری درجهٔ همانندی باید شیوه‌ای برای ادغام مقادیری به کار برد که بیشترین همانندی را نشان داده‌اند. در مطالعهٔ حاضر از روش ادغام وارد[1] استفاده شده است؛ زیرا، در این صورت میزان واریانس درون‌گروهی به حداقل می‌رسد در روش وارد گروه‌هایی ادغام می شوند که افزایش واریانس ناشی از ادغام آن‌ها نسبت به ادغام هریک از آن‌ها با دیگر گروه‌ها حداقل باشد؛ یعنی:

$$d(r,s) = \frac{n_r n_s d_{rs}^2}{(n_r + n_s)}$$

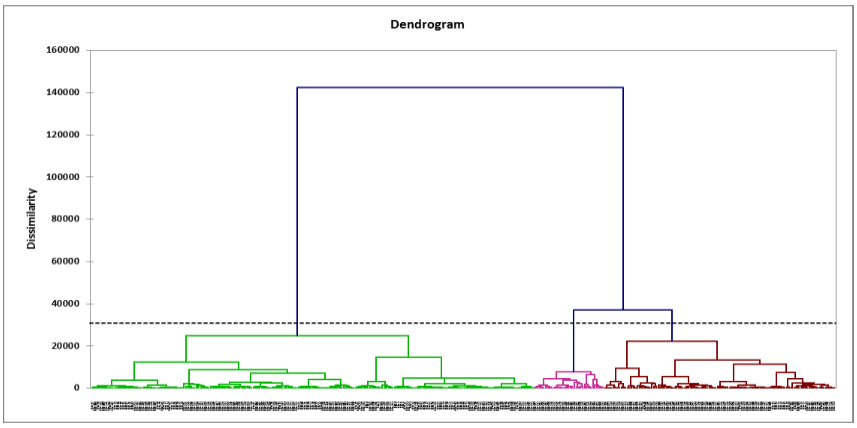
دراینجا $d_{rs}^2$ فاصلهٔ بین گروه r و گروه s است که به روش پیوند وارد به دست آمده است (مسعودیان، ۱۳۸٤). پس از اینکه داده‌ها بر حسب فاصلهٔ‌شان در هم ادغام شدند، گروه بندی می‌شوند. سپس، گروه‌های حاصل به شکل نمودار دندروگرام نمایش داده می‌شوند و درصورتی که هدف تحلیل مکانی باشد، داده‌های گروه‌بندی‌شده به نرم‌افزارهای ترسیمی منتقل می‌شوند و به شکل نقشه نمایش داده می‌شوند.

### ۳. یافته‌های تحقیق

برای شناسایی و تعیین روزه‌های همگن شهر مشهد، ماتریس داده‌های روزانهٔ غلظت ذرات معلق ۲/۵ میکرون با ابعاد ۱۱ * ۳٦٥ به شکل S آرایش داده شد. سپس، تحلیل خوشه‌ای

1. Ward

سلسله‌مراتبی به روش ادغام وارد در محیط‌نرم افـزار XLSTAT2015 صـورت گرفـت کـه نتیجهٔ آن به ترسیم دندروگرام (شکل ۲) منجر شد. مطابق این شکل، غلظـت ذرات معلـق در شهر مشهد در دو بازهٔ زمانی کلی جای می‌گیرد: دورهٔ گرم و دورهٔ سرد سـال کـه دورهٔ سـرد سال خود به دو گروه تقسیم می‌شود. برای نمایش و درک بهتر توزیع روزها در طول سال بـا توجه به کد اختصاص‌داده‌شده شکل (۳) ترسیم و ارائه شده است.




**شکل ۲ - دارنمای ترکیب روزهای سال براساس غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون در شهر مشهد**

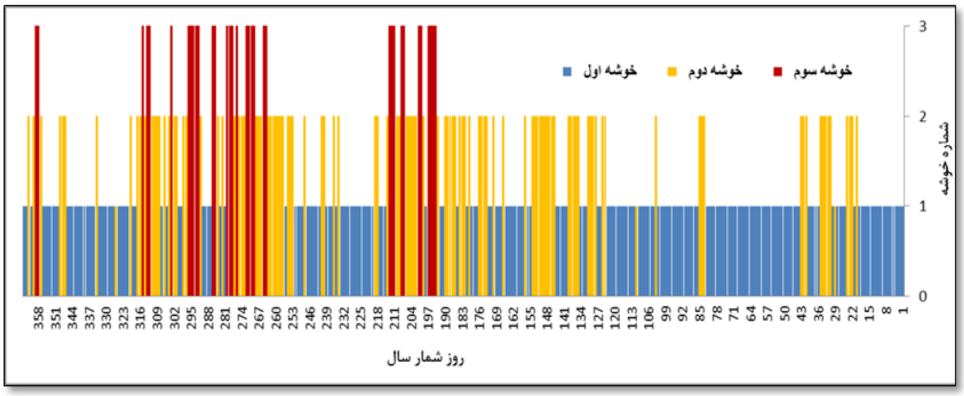
مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

در شکل (۲) سه خوشه یا گروه همگن با رنگ‌های متفاوت نشان داده شده‌اند: خوشهٔ اول در کل طول سال توزیع شده است و مطابق آماره‌های جدول (۱) مقادیر متوسـط آن بـا ۲۸/۲ میکروگرم در متر مکعب از سایر خوشه‌ها کمتر است. با توجه به تمرکز این خوشـه در نیمـهٔ اول سال می‌توان گفت که در نیمهٔ اول سال غلظت ذرات معلق در شهر مشـهد کمتـر اسـت. فراوانی این خوشه ۲۱۷روز در سال است و وجههٔ غالب شهر مشهد است؛ خوشهٔ دوم با ۱۱۳ روز فراوانی و میانگین غلظت ۳٤/۸ میکروگرم در متر مکعب در رتبهٔ بعدی قرار دارد کـه بـا توجه به شکل (۳) توزیع آن در اواسط سال بیشتر اسـت؛ خوشـهٔ سـوم کـه بیـانگر بیشـترین غلظت ذرات معلق است، غالباً در نیمهٔ دوم سال رخ می‌دهد. متوسط غلظـت ذرات معلـق در این خوشه ٤٤/۳۷ میکروگرم در متر مکعب است و فراوانی آن در سال ۳٤ روز است.

**جدول ۱- مقادیر متوسط آماره‌های توصیفی برای هریک از خوشه‌های شناسایی‌شده در مقیاس روزانه**

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

| گروه | تعداد روز | میانگین | حداکثر pm 2.5 | حداقل pm 2.5 | انحراف معیار | واریانس |
|---|---|---|---|---|---|---|
| خوشهٔ یک | ۲۱۷ | ۲۸/۲ | ٤٥ | ١٦ | ٥/٧ | ۳۲/٦ |
| خوشهٔ دو | ١١٤ | ۳٤/۸ | ٥٠ | ٢٤ | ٥/٩ | ۳٥/۸ |
| خوشهٔ سه | ۳٤ | ٤٤/۳ | ٦۳ | ۳٤ | ۷ | ٤٩/٩ |

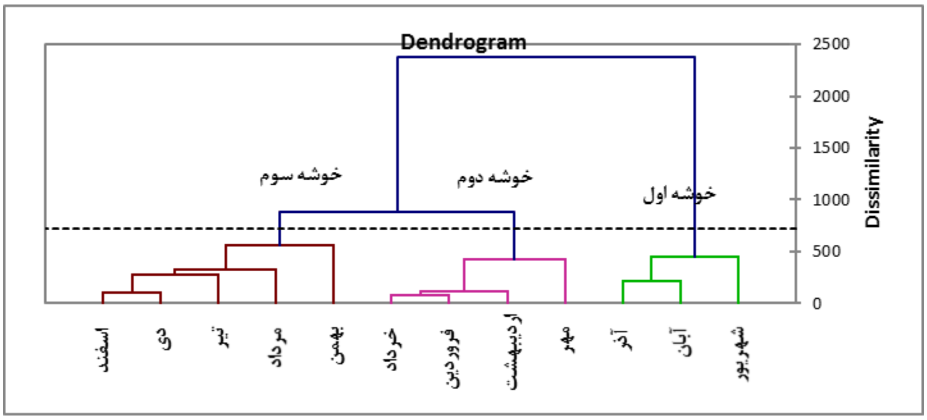



**شکل ۳- توزیع خوشه‌های شناسایی‌شده در طول سال برای شهر مشهد**

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

در شکل (٤) ماه‌های همگن از لحاظ ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/٥ میکرون مشخص شده‌اند. در ماتریس تنظیم‌شده برای این تحلیل ایستگاه‌های موردمطالعه در ستون‌ها و ١٢ ماه سال در ردیف‌ها قرار داده شده است. مطابق خروجی ترسیم‌شده، ماه‌های شهریور، آبان و آذر در خوشهٔ اول جای می‌گیرند و با توجه به آماره‌های درج‌شده در جدول (٢) بالاترین متوسط ذرات معلق را در بین سه خوشهٔ شناسایی‌شده به خود اختصاص می‌دهند. شاید بتوان دلیل این موضوع را در شدت وارونگی‌های دمایی دانست که در ابتدای شروع فصل سرد سال به‌خصوص در آبان و آذر در اثر سیطرهٔ پرفشار سیبری روی شهر مشهد اتفاق می‌افتد (حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۲)؛ صادقی، مفیدی، جهانشیری و دوستان (۱۳۹۳) ؛ محبی پردون، دوستان و زرین، (۱۳۹٦)، اما در خصوص شهریورماه دلیل آن متفاوت است. با توجه به انتهای فصل گرم و خشک سال بیشترین فراوانی وزش بادهای تند که همراه با گردو غبار

نیز است، در این ماه روی می‌دهد (بروغنی، مرادی و زنگنه اسدی (۱۳۹٤)؛ محمدی مرادیـان و حسین‌زاده، ۱۳۹٤) و احتمالاً دلیل هم‌گروهی با دو ماه آبان و آذر این موضوع می‌تواند باشـد. در خوشهٔ دوم ماه‌های فصل بهار به‌همراه مهرماه قـرار گرفته‌انـد. از لحـاظ بـار آلـودگی هـوا کمترین غلظت ذرات معلق در این خوشه ثبت شده است؛ البته بیشترین دامنهٔ تغییرات نیـز در این خوشه دیده می‌شود. فصل بهار به‌دلیل ناپایداری‌های جوّی و تضعیف وارونگی‌ها شرایطی را به وجود می‌آورد که مانع از انباشت غلظت آلاینده‌ها در سطح شهر مـی‌شـود. فصـل بهـار بیشترین روزهای همراه با بارندگی را در شهر مشهد دارد و با توجه به تأثیر مسـتقیم نزولـات جوّی بر کاهش غلظت ذرات معلق باعث شده است که ایـن خوشـه کمتـرین غلظـت ذرات معلق را داشته باشد. ماه‌های تیر و مرداد از فصل تابسـتان و ماه‌هـای دی، بهمـن و اسـفند از فصل زمستان در خوشهٔ سوم جای می‌گیرند. غلظت ذرات معلق در ماهای تیر و مرداد را باید تحت‌تأثیر وزش تندباد و گرد و غبارهای ناشی از فصل گرم سال دانست که غالباً منشأ بیرونی (بیرون از شهر) دارند، اما غلظت ذرات معلق در فصـل زمسـتان تحت‌تـأثیر وارونگـی دمـا و گاهی پایداری‌های جوّی قرار می‌گیرد که در فصل سرد سال اتفاق می‌افتد و منشـأ آن غالبـاً داخلی است که از بخش حمل‌ونقل و صنایع نشئت می‌گیرد.




**شکل ٤- دارنمای ترکیب خوشه های ماهیانه براساس غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون در شهر مشهد**

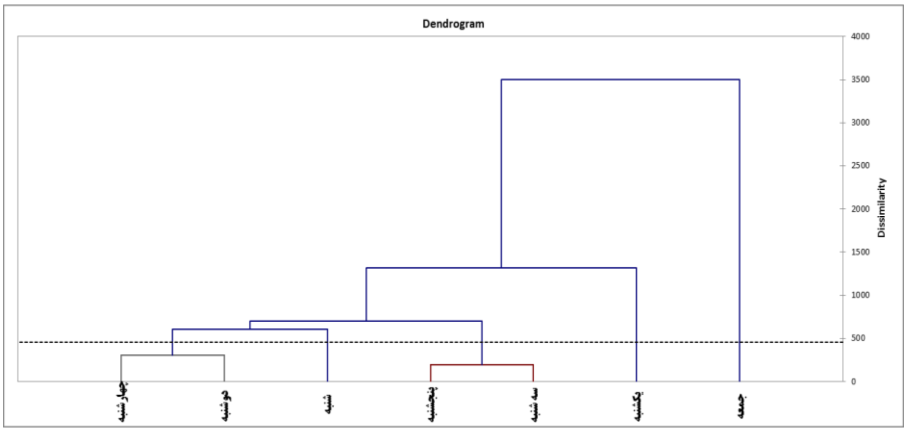
مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

**جدول ۲- مقادیر متوسط آماره‌های توصیفی برای هریک از خوشه‌های شناسایی‌شده در مقیاس ماهیانه**

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

| گروه | تعداد ماه‌ها | میانگین | حداکثر pm 2.5 | حداقل pm 2.5 | انحراف معیار | واریانس |
|---|---|---|---|---|---|---|
| خوشهٔ یک | ۳ | ۳۳/۵ | ٤۲/٤ | ۲۲/۵ | ٦/٦ | ٤۲/۹ |
| خوشهٔ دو | ٤ | ۳۰/٤ | ٤۷/۷ | ١٦/۷ | ۷/۹ | ٦۲/۹ |
| خوشهٔ سه | ۵ | ۳۲/۷ | ٤۷/۱ | ۱۸/۳ | ۹/۱ | ۸۲/۵ |

در تحلیل بعدی روزهای هفته مدنظر قرار داده شده است. بـدین‌منظـور، مـاتریس داده‌ای تشکیل شد که در آن ستون‌ها روزهای هفته (۷ روز) و ردیف‌ها روزها هستند. نتـایج تحلیـل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی به روش ادغام وارد روی داده‌ها نشان داد که به‌طورکلی، روزهای هفته در دو گروه اصلی جای می‌گیرند که در یک طبقه‌بندی کلی، جمعه به‌تنهایی در یک خوشــه و سایر روزهای هفته در گروه دیگر قرار می‌گیرند (شکل ۵). در سطح پایین‌تـر و بـا توجـه بـه سطح برش دندروگرام، چهار خوشهٔ همگن شناسایی‌شدنی است: جمعه و یکشــنبه بــه‌ترتیـب خوشه‌های اول و دوم، سه‌شنبه و پنجشنبه خوشهٔ سوم و درنهایت، خوشهٔ چهارم شامل شنبه، دوشنبه و چهارشنبه می‌شود.




**شکل ۵- دارنمای ترکیب روزهای هفته براساس غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون در شهر مشهد**

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

با توجه به اینکه جمعه‌ها تعطیل است و حجم ترافیک کمتر است و علاوه‌برآن، کارخانجات و صنایع نیز تعطیل است، کمترین غلظت ذرات معلق در این روز وجود دارد و به‌همین‌دلیل، در یک گروه جداگانه قرار می‌گیرد. میانگین غلظت ذرات معلق در این روز ۲۹ میکروگرم در متر مکعب است (جدول ۳). خوشهٔ بعدی که از لحاظ کمترین میانیگن غلظت ذرات در رتبهٔ بعدی قرار دارد، روز یکشنبه است. شاید بتوان فروکش‌کردن تب‌وتاب شهروندان و بار ترافیکی بعد از روز شنبه را دلیل قرارگرفتن این روز در این خوشه دانست، اما آلوده‌ترین روزهای هفته در مشهد سه شنبه‌ها و پنجشنبه‌ها هستند که مطابق دندروگرام در خوشهٔ سه قرار می‌گیرند. میانگین غلظت ذرات معلق در این خوشه با عدد ۳۳ میکروگرم در متر مکعب از سایر خوشه‌ها بیشتر است. درنهایت، در خوشهٔ چهارم روزهای شنبه، دوشنبه و چهارشنبه قرار می‌گیرند.

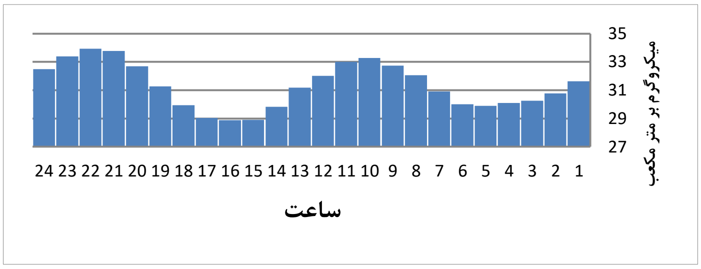
**جدول ۳- مقادیر متوسط آماره‌های توصیفی برای هریک از خوشه‌های شناسایی‌شده در مقیاس روزهای هفته**

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

| گروه | روزهای هفته | تعداد روز | میانگین | حداکثر pm 2.5 | حداقل pm 2.5 | انحراف معیار | واریانس |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| خوشهٔ اول | جمعه | ۲۳۰ | ۲۹ | ٦٨ | ٨/٨ | ۱۲/۱ | ١٤٧ |
| خوشهٔ دوم | یکشنبه | ۲۳۰ | ۳۲ | ١٨٤ | ۷/۷ | ۱۸ | ۳۲٥ |
| خوشهٔ سوم | سه‌شنبه و پنجشنبه | ۲۲۹ | ۳۳ | ۷۲ | ۷/۱ | ۱۳/۷ | ۱۸۹ |
| خوشهٔ چهارم | شنبه، دوشنبه و چهارشنبه | ۲۲۹ | ۳۲/٤ | ۸۳ | ۷/۹ | ١٤/۲ | ۲۰۲ |

شاید بتوان تحلیل تغییرات ساعتی بار آلودگی هوا را یکی از مهم‌ترین اطلاعات در زمینهٔ مدیریت و برنامه‌ریزی آلودگی هوا در شهرها دانست. بسیاری از برنامه‌ها ازجمله تغییر ساعات کار ادارات، تنظیم برنامهٔ فعالیت‌های ورزشی، ساعات خرید، فعالیت‌های عمرانی و غیره را می‌توان با توجه به بار آلودگی هوا تنظیم و برنامه‌ریزی کرد. در شکل (٦) روند

تغییرات ساعتی بار آلودگی هوا برای شهر مشهد نشان داده شده است. مطابق این نمودار، غلظت ذرات معلق در هوای شهر مشهد در ابتدای روز روندی کاهشی دارد، اما به‌دلیل تأثیر وارونگی دمایی بر تراکم آلاینده‌ها و همچنین، شروع جنب‌وجوش صبحگاهی که با افزایش ناگهانی بار ترافیک صبحگاهی همراه است، باعث افزایش بار آلودگی هوا می‌شود که در ساعت ۱۰ صبح به اوج صبحگاهی خود می‌رسد و دوباره روند کاهشی را در پیش می‌گیرد تا در ساعت ١٦ به حداقل ممکن خود می‌رسد. به نظر می‌رسد ازیک‌سو، کاهش بار ترافیکی و ازسوی‌دیگر، افزایش سرعت باد در ساعات عصرگاهی باعث وقوع این موضوع می‌شود. دوباره با افزایش بار ترافیک شبانگاهی روند افزایش بار آلودگی هوا شروع می‌شود و در ساعت ۲۲ به حداکثر ممکن خود می‌رسد؛ بنابراین، حداقل و حداکثر بار آلودگی هوای مشهد در طی دورهٔ آماری بررسی‌شده، به‌ترتیب در ساعت ١٦ و ساعت ۲۲ روی می‌دهد.

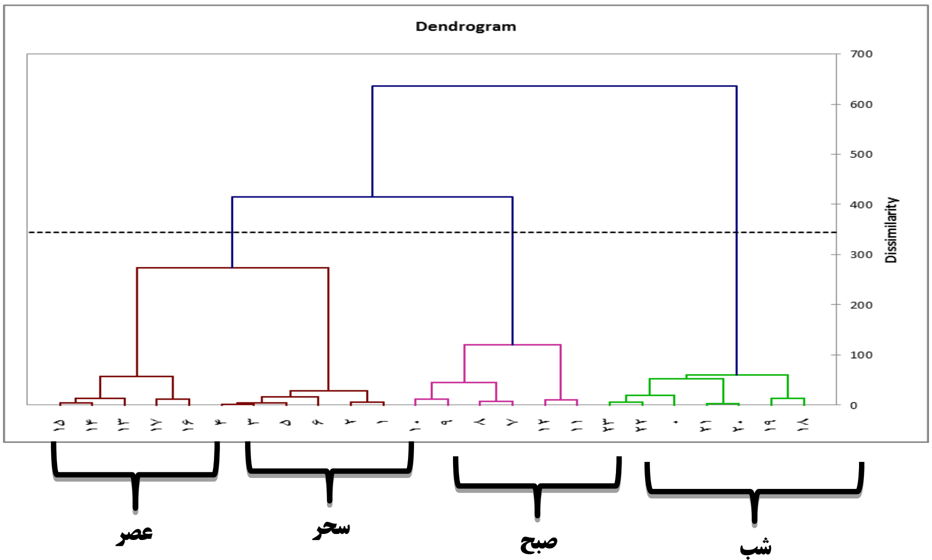



**شکل ٦- روند تغییرات ساعتی ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون شهر مشهد در دورهٔ آماری ۱۳۹۰ تا ۱۳۹٤**

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

در ماتریس تشکیل‌یافته از داده‌های دورهٔ آماری پنج‌سالهٔ موردبررسی که به شکل s آرایش یافته است، ایستگاه‌ها در ستون‌ها و ساعات در ردیف‌ها قرار داده شدند. نتایج حاصل از خوشه‌بندی در شکل (۷) نشان داده شده است. براساس این دندروگرام سه خوشهٔ مجزا را می‌توان تفکیک کرد: در خوشهٔ اول که خود به دو خوشهٔ مجزا تقسیم شده است، دو بازهٔ زمانی سحر و عصر تفکیک‌شدنی است؛ به‌عبارتی، در زیرمجموعهٔ این خوشه می‌توان از ساعت ۱ تا ٦ صبح را در یک گروه قرار داد و از ساعت ۱۳ تا ۱۷ بعدازظهر را در یک خوشه

قرار داد. مطابق جدول (٤)، میانگین غلظت ذرات معلق در خوشهٔ صبح ۳ میکروگرم در متر مکعب و در عصر ۲۹ است که کمترین مقدار در بین خوشه‌های شناسایی‌شده است؛ بنابراین، بهترین کیفیت هوای شهر مشهد در این خوشه اتفاق می‌افتد و درمجموع، کیفیت هوا در خوشهٔ عصر و سحر دارای کمترین بار آلودگی هوا است؛ خوشهٔ بعدی که با همان خوشهٔ اول به هم می‌پیوندند، ٦ ساعت از ساعات میانی روز را در بر گرفته است. مطابق شکل ترسیم‌شده، این خوشه از ساعت ۷ صبح تا ۱۲ را در بر می‌گیرد. متوسط غلظت ذرات معلق در این خوشه ۳۲/٤ است که در رتبهٔ دوم در بین خوشه‌های شناسایی‌شده است؛ اما خوشهٔ چهارم شناسایی‌شده که با ۳۲/۷ میکرو گرم در متر مکعب بیشترین غلظت ذرات معلق را داراست و با ۷ ساعت طولانی‌ترین خوشه از لحاظ زمانی نیز است، از ساعت ۱٦ شروع می‌شود و تا ساعت ٢٤ بامداد طول می‌کشد.




**شکل ۷- دارنمای ترکیب خوشه ها در مقیاس ساعتی براساس غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون**

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

**جدول ٤- مقادیر متوسط آماره‌های توصیفی برای هریک از خوشه‌های شناسایی‌شده در مقیاس ساعتی**

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

| گروه | خوشه | میانگین | حداکثر غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون | حداقل غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون | انحراف معیار | واریانس |
|---|---|---|---|---|---|---|
| خوشهٔ اول | عصر | ۲۹ | ٤۳ | ۱۹/٤ | ۷/٤ | ٥٥ |
| خوشهٔ دوم | سحر | ۳۰ | ٤۳ | ۱۹/٥ | ۸ | ٦٤/۷ |
| خوشهٔ سوم | صبح | ۳۲/٤ | ٤۷ | ۲۰/٥ | ۸/۸ | ۷۷/٤ |
| خوشهٔ چهارم | شب | ۳۲/۷ | ٤۸/٥ | ۲۲/۹ | ۸ | ٦٤/۷ |

## ٤. نتیجه‌گیری

در این تحقیق ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/٥ میکرون با استفاده از تکنیک خوشه‌بندی در مقیاس روزهای سال، ماهانه، روزهای هفته و ساعات شبانه‌روز تجزیه‌وتحلیل شدند. نتایج تحلیل سلسله‌مراتبی به روش ادغام وارد نشان داد که ۳٦٥ روز سال را می‌توان به سه خوشهٔ مجزا تفکیک کرد: خوشهٔ اول با ۲۱٥ روز فراوانی و ۲۸/۱ میکروگرم در متر مکعب دارای کمترین بار آلودگی هواست و روزهای پاک مشهد در این خوشه جای می‌گیرند. مطابق شکل (۳) توزیع این خوشه در کل سال است، اما خوشهٔ دوم شامل ۱۱٤ روز از سال می‌شود. رخداد خوشهٔ دوم در کل سال دیده می‌شود، اما تمرکز آن در اواسط سال بیشتر است. متوسط غلظت ذرات معلق این خوشه ۳٤/۸ است که در رتبهٔ دوم قرار دارد؛ خوشهٔ سوم با ۳٤ روز در سال دارای کمترین فراوانی و بیشترین غلظت ذرات معلق است. مطابق آماره های مندرج در جدول (۱) ، غلظت ذرات معلق در این خوشه ٤٤/۳ است که بیشترین غلظت در بین خوشه‌هاست. رخداد آن در اواخر شهریور ماه و نیمهٔ دوم سال به‌خصوص در ماه‌های آذر و دی است.

نتایج تحلیل خوشه‌ای ماه‌های سال نشان داد که ۱۲ ماه سال را می‌توان در سه خوشه جای داد: ماه‌های آذر، آبان و شهریور در یک خوشه با میانگین ۳۳/٥ میکروگرم در متر مکعب

بیشترین غلظت را دارند؛ خوشهٔ دوم که کمترین بار آلودگی هوا را دارد، چهار ماه از سال را در بر می‌گیرد و به‌ترتیب ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد و مهر در این خوشه جای می‌گیرند و خوشهٔ سوم شامل پنج ماه از سال می‌شود و متوسط غلظت ذرات معلق در این خوشه ۳۳/۷ میکروگرم در متر مکعب است.

در تحلیل بعدی روزهای هفته ارزیابی شده است. برخی از سیاست‌ها و برنامهٔ کاهش و کنترل آلودگی هوا در مقیاس روزهای هفته مطرح می‌شود؛ ازجمله تعطیلی پنج‌شنبه‌ها یا سه‌شنبه‌های بدون خودرو؛ ازاین‌رو، دسترسی به چنین اطلاعاتی دست‌اندرکاران و تصمیم‌گیران را یاری خواهد کرد. روزهای هفته را می‌توان در چهار دسته خوشه‌بندی کرد. روز جمعه به‌تنهایی در یک خوشهٔ مجزا از دیگر روزهای هفته قرار می‌گیرد. به نظر می‌رسد تعطیلی ادارات، مدارس و صنایع و به تبع آن، کاهش حمل‌ونقل باعث کاهش بار آلودگی هوا در این روز شده است. خوشهٔ بعدی شامل یکشنبه‌هاست که با میانگین غلظت ذرات ۳۲ میکروگرم در متر مکعب به‌تنهایی بعد از جمعه‌ها قرار دارد.

اما بیشترین بار آلودگی هوای شهر مشهد در خوشهٔ سوم اتفاق می‌افتد؛ جایی که روزهای سه‌شنبه و پنج‌شنبه قرار دارند. متوسط غلظت ذرات معلق در این خوشه ۳۳ میکروگرم در متر مکعب است. و درنهایت، خوشهٔ چهارم که روزهای شنبه، دوشنبه و چهارشنبه را در بر می‌گیرد.

از نتایج دیگر این تحقیق، تفکیک ساعات شبانه‌روز از لحاظ بار آلودگی هوا به چهار دسته است که با توجه به ساعات رخداد، هر خوشه به نام‌های خوشهٔ سحر، صبح ، عصر و شب نام‌گذاری شده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، کمترین بار آلودگی هوا در شهر مشهد در خوشهٔ عصر است. این خوشه از ساعت ۱۳ تا ۱۷ را در بر می‌گیرد که دلیل آن می‌تواند کاهش بار ترافیکی و افزایش سرعت باد در این دورهٔ زمانی باشد، اما خوشهٔ بعدی که زیرمجموعهٔ همان خوشهٔ اول محسوب می‌شود، سحر است که از ساعت ۱ تا ٦ بامداد را در بر می‌گیرد و از لحاظ بار آلودگی هوا بعد از خوشهٔ عصر دارای کمترین غلظت ذرات معلق است. خوشهٔ سوم شامل ساعت ۷ تا ۱۲ می‌شود، اما از ساعت ۱۸ تا ۲٤ بامداد که خوشهٔ چهارم به نام شب نام‌گذاری شده است، دارای طولانی‌ترین ساعات و بیشترین بار آلودگی هواست. مطابق شکل

(۵)، بیشترین بار آلودگی هوای مشهد در ساعت ۲۱ تا ۲۲ در دورهٔ مطالعه‌شـده اتفـاق افتـاده است.

**کتابنامه**


۱. ادب، ح. (۱۳۹٤) . مکان‌یابی و اولویت‌بندی محل اسـتقرار ایسـتگاه‌های سـنجش کیفیـت هـوای مشهد. سبزوار: طرح پژوهشی دانشگاه علامه حکیم سبزواری.

۲. اسماعیلی، ر. (۱۳۹۲). کاربرد تحلیل خوشه‌ای در گروه‌بندی ایسـتگاه‌های سـنجش آلـودگی هـوا (مطالعهٔ موردی شهر مشهد). ارائه‌شده در *دومین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا*، ٤ تا ۵ دی ماه، مرکز همایش‌های بین‌المللی صدا و سیما، تهران.

۳. اسماعیلی، ر. (۱۳۹۷). نواحی همگن آلودگی هوای مشهد. *مجلهٔ مخاطرات محیط طبیعی*، *۷*(١٦)، ۲۲۷–۲٤۰.

٤. بروغنی، م.، مرادی، ح. ر.، و زنگنه اسدی، م. ع. (۱۳۹٤). تحلیل وقوع گرد و غبار و پهنه‌بندی آن در استان خراسان رضوی. *فصلنامهٔ علمی- پژوهشی پژوهش‌های فرسایش محیطی*، *۵*(٤)، ٤۵–۵۷.

۵. حاتمی، خ.، بیگلو، ب.، نارنگی‌فرد، م.، و امیدوار، ک. (۱۳۹۳) . *شناسایی الگوهای همدید روزهای آلوده به ذرات معلق به روش واکاوی خوشه‌ای شهر شیراز* . *مجلهٔ مخاطرات محیط طبیعـی*، ۳(٤)، ۸۱–۹٤.

٦. حجازی ،ع.، مباشری، م.، و احمدیان مـرج، ا. (۱۳۹۱). تهیـهٔ نقشـهٔ توزیـع مکـانی ذرات معلـق کوچکتر از ۲/۵ میکرون با قطر کمتر از دو و نیم میکرومتر در هـوای شـهر تهـران بـا اسـتفاده از داده‌های سنجندهٔ مودیس.*تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)*، ۲٦، ۱٦۱–۱۷۸.

۷. حسین‌زاده ،ر.، دوستان، ر.، حقیقت ضیا بری، م.، و حقیقت ضیا بری، م. (۱۳۹۲). بررسی الگوهای همدید مؤثر بر آلودگی هوا در کلان‌شهر مشهد. *مجلهٔ جغرافیا و توسعهٔ ناحیه‌ای*، *۲۱*، ۸۱– ۱۰۱.

۸. صادقی، س.، مفیدی، ع.، جهانشیری، م.، و دوستان، ر. (۱۳۹۳). نقـش الگوهـای گـردش مقیـاس منطقه‌ای جو بر وقوع روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد. *جغرافیـا و مخـاطرات محیطـی*، ۳(۱۰)، ۱–۳۵.

۹. محبی پردون، ف.، دوستان، ر.، و زرین، آ. (۱۳۹٦) . *تأثیر پرفشار سیبری بر بارش‌های شرق ایران در ماه نوامبر*. مقالهٔ ارائه‌شده در اولین کنفرانس بـین‌المللـی توسـعهٔ پایـدار در کشـاورزی، محـیط زیست، گردشگری و منابع طبیعی شیراز، ۷ دی، شیراز.

۱۰. محمدی مرادیان، ج.، و حسین‌زاده، س. ر. (۱۳۹٤). پایش ماهواره‌ای و تحلیل همدید پدیدهٔ گرد و غبار در کلان‌شهر مشهد طی دورهٔ آماری ۲۰۱۳–۲۰۰۹. *فصلنامهٔ جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ٤، ۵۷–۳۵.

۱۱. محوی، ا.، نبی‌زاده، ر.، حسنوند، م.، تقی‌پور، ح.، فریدی، س.، و غلامپور، ا. (۱۳۹۳). بررسی تغییرات ذرات معلق هوای آزاد شهر تبریز طی سال‌های ۱۳۹۱ الی ۱۳۹۲ و ارزیابی اثرات بهداشتی منتسب به آن‌ها. مقالهٔ ارائه‌شده در *سومین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا*، ۲٤ تا ۲۵ دی، مرکز همایش‌های بین‌المللی صدا و سیما، تهران.

۱۲. مسعودیان، ا. ( ۱۳۸٤). شناسایی رژیم‌های بارش ایران بـه روش تحلیل خوشـه‌ای. *پژوهش‌های جغرافیایی*، *۵۲*، ٤۷–۵۹.

۱۳. منتظری، م. (۱۳۹۰). شناسایی فصول دمایی ایران به روش تحلیل خوشـه‌ای. *فصلنامهٔ تحقیقات جغرافیایی*، ۲٦(۲)، ۱۷۳–۱۹۸.

۱٤. مؤمنی، م. (۱۳۹۰). *خوشه‌بندی داده‌ها (تحلیل خوشه‌ای)*. تهران: انتشارات مؤلف.

۱۵. میری، م.، قانعیان، م.، قلیزاده ، ع.، یزدانی اول، م.، و نیکونهاد، ع. (۱۳۹٤). تحلیل و پهنه‌بندی آلودگی هوای شهر مشهد با استفاده از مدل‌های مختلف تحلیل فضایی. *مجلهٔ مهندسی بهداشت محیط*، **۲**، ۱٤۳–۱۵٤.

۱٦. یونسیان، م.، پرمی، س.، رفیعی تبریزی، ع.، ندافی، ک.، ارحامی، م.، و حسنوند، م. (۱۳۹۳). بررسی غلظت ذرات معلق (pm10,pm2.5 ,pm1) هوای آزاد و داخل در زمان وقوع پدیدهٔ ریزگردها در شهر تهران. مقالهٔ ارائه‌شده در *سومین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا*، ۲٤ تا ۲۵ دی، مرکز همایش‌های بین‌المللی صدا و سیما، تهران.

17. Boubel, R. W., Vallero, D., Fox, D. L., Turner, B., & Stern, A. C. (2013). *Fundamentals of air pollution*. Berlin, Germany: Elsevier.

18. Iizuka, A., Shirato, S., Mizukoshi, A., Noguchi, M., Yamasaki, A., & Yanagisawa, Y. (2014). A cluster analysis of constant ambient air monitoring data from the Kanto Region of Japan. *International journal of environmental research and public health*, *11*(7), 6844-6855.

19. Koelemeijer, R. B. A., Homan, C. D., & Matthijsen, J. (2006). Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe. *Atmospheric Environment*, *40*(27), 5304-5315.

20. Núñez-Alonso, D., Pérez-Arribas, L. V., Manzoor, S., & Cáceres, J. O. (2019). Statistical tools for air pollution assessment: multivariate and spatial analysis

studies in the Madrid region. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, *6*, 1-9.

21. Ojeda-Magaña, B., Cortina-Januchs, M. G., Barrón-Adame, J. M., Quintanilla-Domínguez J., Hernandez, W., Vega-Corona A., Ruelas, R., & Andina, D. (2010). Air pollution analysis with a PFCM clustering algorithm applied in a real database of Salamanca (Mexico). *International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1297– 1302). Vina del Mar, Santiago, Chile.
22. Prapassornpitaya, S., Jinsart, W., & Sanguansintukul, S. (2011). *Mapping of urban air quality by clustering analysis and geographic information system*. Retrieved from https://www.casanz.org.au/
23. Pu, H., Luo, K., Wang, P., Wang, S., & Kang, S. (2017). Spatial variation of air quality index and urban driving factors linkages: Evidence from Chinese cities. *Environmental Science and Pollution esearch*, *24*(5), 4457-4468.
24. Querol, X., Alastuey, A., Moreno, T., Viana, M. M., Castillo, S., Pey, J., …, & Sanchez A. (2008). Spatial and tempo-ral variations in airborne particulate matter (PM10 and PM2.5) across Spain 1999–2005. *Atmospheric Environment*, *42*(17), 3964–3979.
25. Saithan, K., & Mekparyup, J. (2012) Clustering of air quality and meteorological variables associated with high ground ozone concentration in the industrial areas, at the East of Thailand. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, *81*(3), 505-515
26. Saksena, S., Joshi, V., & Patil, R.S. (2002). Determining spatial patterns in Dehli ambient air quality data using cluster analysis. *Environmental Change, Vulnerability and Goverance Series*, *53*, 1-31.
27. World Health Organization (WHO). (2014). *Air quality and health*. Retrieved from http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/